

IX CONGRESSO DE
Construção Metálica
e Mista

I CONGRESSO
LUSO-BRASILEIRO DE
Construção Metálica Sustentável

ESTUDO EXPERIMENTAL DE SISTEMAS ADESIVOS VIDRO-AÇO

Raquel Pardal^a, Paulo J. S. Cruz^b e Isabel B. Valente^c

^{a,b} *ISISE, Escola de Arquitectura, Universidade do Minho*

^c *ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho*

Resumo. A presente comunicação apresenta o estudo experimental de provetes de vidro reforçados com chapas metálicas pelo exterior, por intermédio de dois tipos de adesivo com diferentes características. Pretende-se avaliar o comportamento dos adesivos utilizados e a sua interação com o elemento de vidro e as chapas de aço. Para tal, são realizados ensaios de tipo *pull-out*. Para além do comportamento mecânico da ligação colada, pretende-se ainda avaliar a influência da temperatura no desempenho dos sistemas adesivos. Deste modo, são realizados ensaios de tipo *pull-out* a 23°C (temperatura ambiente), 40°C e 70°C, com os quais é avaliado o comportamento da ligação e são observados os modos de rotura.

1. Introdução

A utilização do vidro em elementos estruturais tem-se vindo a desenvolver nos últimos anos. O vidro, quando utilizado como material estrutural, apresenta algumas desvantagens em relação a outros materiais tradicionais, salientando-se uma reduzida resistência à tracção e um comportamento frágil. Uma das soluções encontradas para aumentar a resistência e a ductilidade do vidro é a sua associação com outro material [1]. A ligação adesiva é uma solução que tem sido estudada por diversos autores [2,3,4,5,6], uma vez que faculta uma adesão com total transparência, isenta de qualquer ligação mecânica e não implica a realização de aberturas nem a aplicação de sistemas aparafusados. Neste caso, a transferência de esforços entre o vidro e o material de reforço é efectuada por meio da camada adesiva, sendo o comportamento pós-rotura do vidro reforçado dependente dessa transferência. Os esforços que se estabelecem na ligação podem ser variáveis para diferentes níveis de temperatura devido às propriedades viscoelásticas deste tipo de adesivos.

Neste sentido, o estudo experimental desenvolvido permite avaliar o comportamento da interface colada entre vidro e aço quando sujeita a diferentes temperaturas. Este trabalho visa contribuir para o estudo futuro de vigas de vidro reforçadas exteriormente com elementos metálicos, através de um sistema colado de elevado desempenho que apresente um comportamento adequado perante o aumento da temperatura.

2. Selecção dos sistemas adesivos

A selecção dos sistemas adesivos teve como base uma pesquisa prévia dos produtos existentes no mercado, o contacto com as empresas que produzem ou comercializam esses produtos e a consulta de bibliografia.

Como base nos estudos desenvolvidos por Louter [1] e Overend *et al* [2], foi possível seleccionar os adesivos mais adequados, tendo por base seguintes critérios: elevada resistência ao corte; diferentes níveis de ductilidade; perda mínima de resistência após a exposição a diferentes temperaturas, fácil manuseamento e tempo de cura rápido.

Os sistemas de adesivos seleccionados foram o adesivo estrutural 3M DP490 à base de resina epóxida, bi-componente (resina + endurecedor) e o adesivo estrutural Huntsman Araldite 2047 metacrilato, bi-componente (resina + endurecedor). A Tabela 1 apresenta algumas características dos sistemas de adesivos seleccionados.

Tabela 1: Propriedades dos adesivos seleccionados

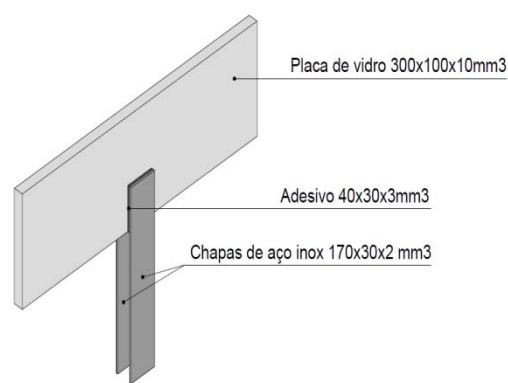
Adesivo	Cor	Ductilidade	Tempo de cura mínimo (h)	Facilidade de Manuseamento
3M DP490	Preto	Baixa	24	Alta
Araldite 2047	Acastanhado	Alta	48	Alta

3. Descrição dos provetes de ensaios

Todos os provetes apresentam uma placa rectangular de vidro simples temperado com dimensões de $300 \times 100 \times 10 \text{ mm}^3$. Em cada face da placa de vidro foram coladas duas chapas em aço inox AISI 304 com dimensões $170 \times 30 \times 2 \text{ mm}^3$. Todas as medidas têm uma tolerância de $\pm 1 \text{ mm}$. A configuração do provete é representada na Fig.1.



a) Configuração do provete



b) Esquema da configuração do provete

Fig. 1: Configuração do provete

A área de colagem da ligação adesiva apresenta 40 mm de altura por 30 mm de largura e a espessura do adesivo tem o valor de 0.3 mm. De forma a garantir a espessura no adesivo de 0.3 mm em todos os provetes, foi colocado um espaçador entre as duas chapas metálicas durante o período de colagem e de cura, como é demonstrado na Fig.2.



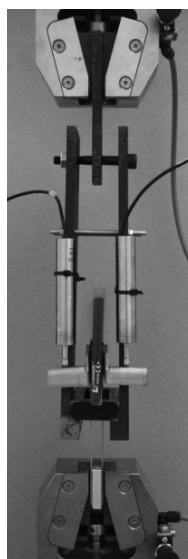
Fig. 2: Pormenor do espaçador e da ligação adesiva

3.1 Preparação das superfícies e processo de colagem

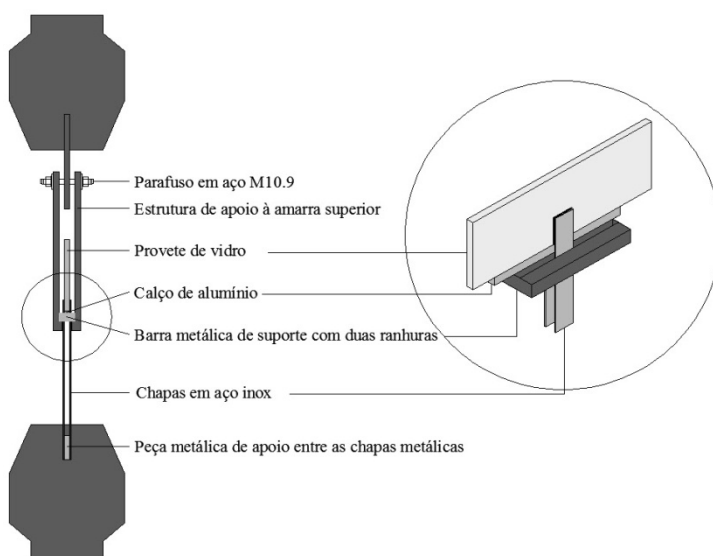
A resistência e durabilidade da ligação adesiva dependem de um tratamento adequado das superfícies a serem coladas. Assim, todas as superfícies de aço e vidro foram cuidadosamente limpas com álcool isopropílico antes da aplicação do adesivo, garantindo a remoção de sujidade e humidade nas zonas de contacto entre o adesivo e o vidro e o adesivo e a chapa. Na zona de contacto, as chapas de aço inox foram lixadas antes da aplicação do adesivo para permitir uma maior aderência entre os dois materiais. A aplicação do adesivo foi efectuada com pistolas de cartucho. O tempo de cura para todos os provetes foi de 72 horas, independentemente do adesivo utilizado.

4. Procedimento de ensaio

A configuração do ensaio é apresentada na Fig. 3. Os ensaios são realizados com a máquina Microtest EM1/50 que tem capacidade máxima de 50 kN.



a) Fotografia



b) Esquema resumo

Fig. 3: Configuração do ensaio

O provete é suportado em peças metálicas que são fixas às amarras metálicas superiores. Estas amarras são acopladas à máquina Microtest. Foi concebida uma peça metálica com duas ranhuras que garante o apoio do provete na amarra superior e permite a passagem das chapas de aço inox que são fixas à amarra inferior

Entre a peça metálica de suporte com duas ranhuras e o provete é colocado um calço de alumínio, que tendo um módulo de elasticidade igual ao do vidro, previne a ocorrência de concentração de tensões na zona de contacto e a consequente rotura prematura do vidro. Foram concebidas duas peças metálicas acessórias que são coladas em cada chapa de aço inox (Fig.3 e 4), para a medição do escorregamento entre estas e a placa de vidro, na zona da ligação adesiva.

Por sua vez, os dois transdutores são fixos à amarra superior com o sensor de medição em descanso sobre as peças metálicas acessórias já referidas. Desta forma, é possível medir separadamente o escorregamento entre a placa de vidro e a chapa inox, em cada lado da ligação adesiva.

A fixação das chapas de aço inox na amarra inferior teve o apoio de um espaçador metálico entre as duas chapas, evitando o escorregamento e garantindo o seu afastamento.

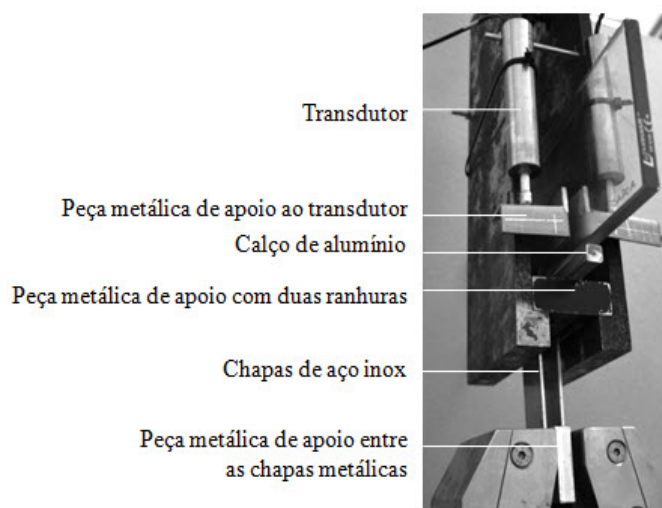


Fig. 4: Pormenorização da montagem do ensaio

Todos os testes foram realizados com controlo de deformação, impondo uma velocidade de deslocamento na amarra inferior igual a 0.2 mm/min.

No início de cada ensaio, foi aplicada uma pré-carga de 0.5 kN com uma velocidade de deslocamento de 5 mm/min.

Os ensaios foram divididos em três séries, correspondentes às seguintes gamas de temperatura: 23°C, 40°C e 70°C. Em cada série de ensaios foram testados no mínimo três provetes para cada tipo de adesivo.

Os provetes ensaiados a 40°C e a 70°C foram previamente aquecidos durante 24h na câmara climática Fitoclima 300, com temperatura constante de 40°C e 70°C, respetivamente, e humidade relativa de 50%.

A temperatura média medida na sala de ensaios foi 23°C com a humidade relativa média foi de 55%.

Os ensaios foram realizados no LCT (Laboratório de Construção e Tecnologia) da Escola de Arquitectura da Universidade do Minho.

5. Resultados dos ensaios

5.1 Resultados dos ensaios à temperatura de 23°C

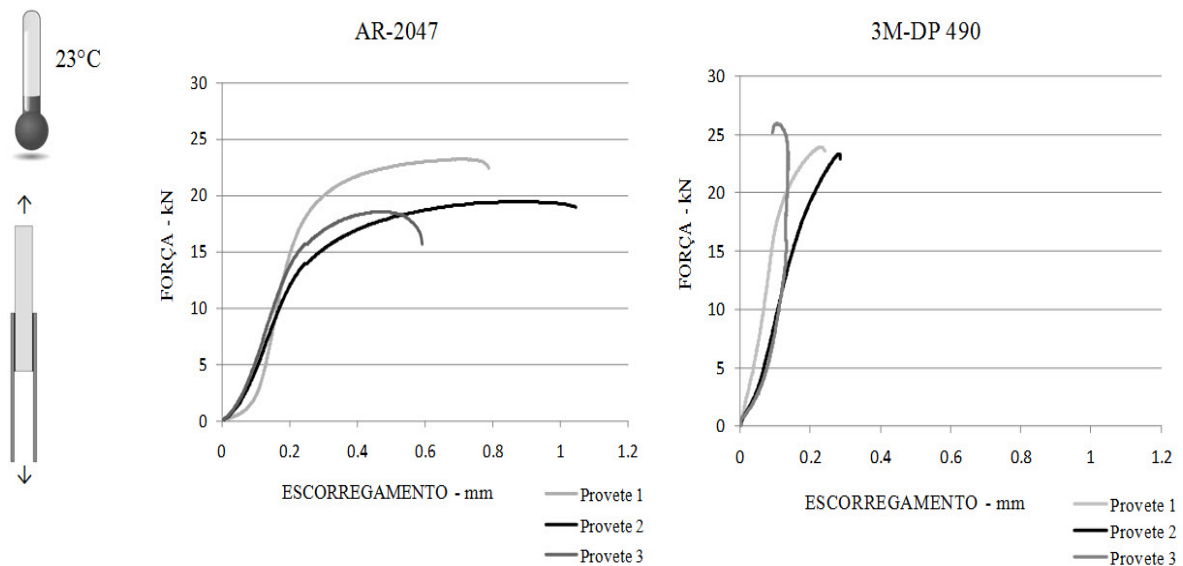


Fig. 5: Diagramas força-deslocamento dos ensaios de tipo de *pull-out* realizados a 23°C

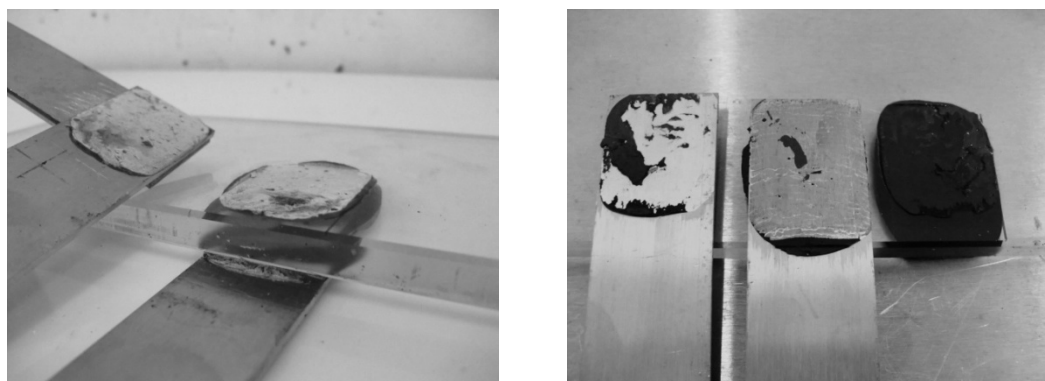
Os resultados obtidos pelos ensaios à temperatura de 23°C são apresentados na Fig.5. e na Tabela 2.

Nos ensaios correspondentes ao adesivo Araldite 2047 verifica-se a ocorrência de deformação plástica antes da rotura e menor capacidade de carga em comparação com o adesivo 3M DP490. Os provetes correspondentes ao adesivo 3M DP490 apresentam um comportamento mais frágil, mas com capacidade de carga superior. A curva correspondente ao provete 3 apresenta um desvio nos valores do escorregamento a partir do valor de carga de aproximadamente 15 kN. Isto deve-se a um erro de leitura dos transdutores a partir desse valor de carga. No entanto, foi possível registrar a capacidade de carga até à rotura.

Não se verificou modos de rotura associados ao esmagamento do vidro por compressão, nem associados às chapas de aço inox. Os modos de roturas são descritos na tabela 2 e representados na Fig. 6.

Tabela 2: Resultados numéricos dos ensaios de tipo de *pull-out* realizados a 23°C

AR-2047	$F_{m\acute{a}x}$	F_u	$d(F_{m\acute{a}x})$	$d(F_u)$	Modos de Rotura
	(kN)	(kN)	(mm)	(mm)	
Provete 1	23.19	22.41	0.71	0.79	Rotura no adesivo
Provete 2	19.44	18.91	0.88	1.05	Rotura no adesivo
Provete 3	18.54	15.71	0.48	0.59	Rotura no adesivo
Média	20.39	19.01	0.69	0.81	
3M DP490					
Provete 1	23.90	23.59	0.23	0.24	Rotura na interface aço-adesivo
Provete 2	23.31	22.9	0.28	0.29	Rotura na interface aço-adesivo
Provete 3	25.19	25.19	0.11	0.09	Rotura na interface aço-adesivo
Média	24.37	23.89	0.21	0.21	



a) Rotura pelo adesivo – A2047 b) Rotura na interface aço-adesivo – 3M DP490

Fig. 6: Modos de rotura dos provetes à temperatura de 23°C

5.2 Resultados dos ensaios à temperatura de 40°C

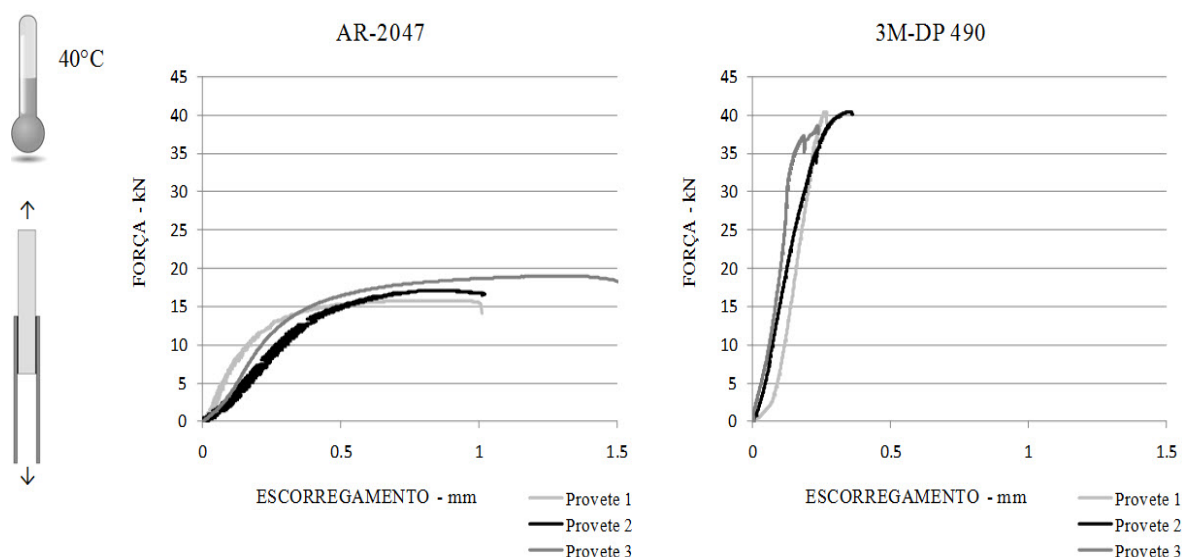


Fig. 7: Diagramas força-deslocamento dos ensaios de tipo de *pull-out* realizados a 40°C

Os resultados obtidos nos ensaios realizados à temperatura de 40°C são apresentados na Fig. 7 e na Tabela 3.

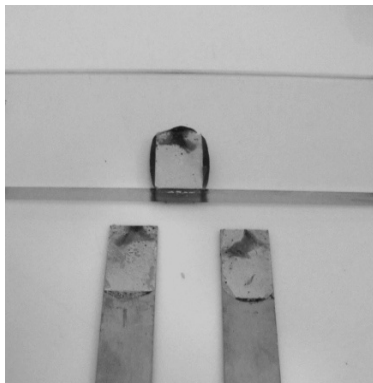
Observa-se uma diferença significativa no comportamento estrutural dos dois sistemas adesivos. Nos ensaios correspondentes ao adesivo Araldite 2047 foi observada uma perda de resistência média de aproximadamente 15 % em comparação com os resultados obtidos à temperatura ambiente. No entanto, verificou-se a ocorrência de deformação plástica neste adesivo antes da rotura.

Nos ensaios correspondentes ao adesivo 3M DP490 foi observado um aumento significativo da capacidade de carga média do adesivo na ordem de 60% em comparação com os resultados obtidos à temperatura ambiente. Não foi observado nenhuma deformação plástica antes da rotura.

Não se verificou modos de rotura associados ao esmagamento do vidro por compressão, nem associados às chapas de aço inox. Os modos de roturas são descritos na Tabela 3 e representados na Fig. 8.

Tabela 3: Resultados numéricos dos ensaios de tipo de *pull-out* realizados a 40°C

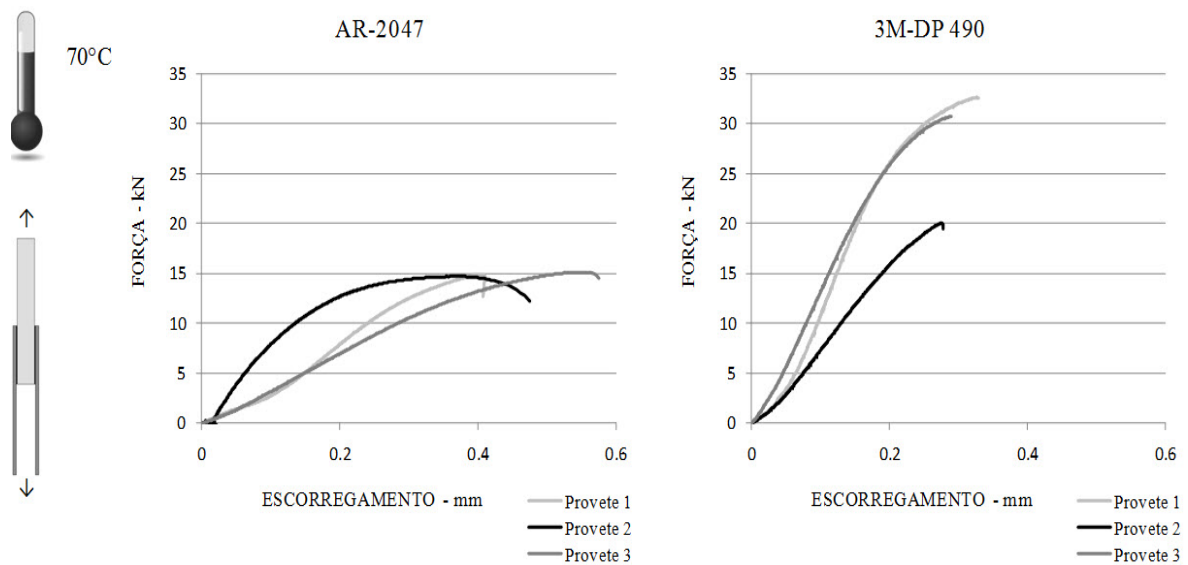
AR-2047	$F_{\text{máx}}$	F_u	$d(F_{\text{máx}})$	$d(F_u)$	Modos de Rotura
	(kN)	(kN)	(mm)	(mm)	
Provete 1	15.72	14.05	0.95	1.01	Rotura no adesivo
Provete 2	17.02	16.53	0.87	1.01	Rotura no adesivo
Provete 3	19.03	18.20	1.33	1.50	Rotura no adesivo
Média	17.26	16.26	1.05	1.17	
3M-DP490					
Provete 1	40.45	38.94	0.26	0.27	Rotura do vidro
Provete 2	40.42	40.04	0.35	0.36	Rotura do vidro
Provete 3	38.58	37.61	0.23	0.24	Rotura do vidro
Média	39.82	38.86	0.28	0.29	

a) Rotura pelo adesivo –
– AR 2047

b) Rotura do vidro – 3M DP490

Fig. 8: Modos de rotura dos provetes à temperatura de 40°C

5.3 Resultados dos ensaios à temperatura de 70°C

**Fig. 9:** Diagramas força-deslocamento dos ensaios de tipo de *pull-out* realizados a 70°C

Os resultados obtidos pelos ensaios à temperatura de 70°C são apresentados na Fig. 9 e na Tabela 4. Foi registrada, igualmente, uma diferença significativa no comportamento estrutural

entre os dois sistemas adesivos. Nos ensaios correspondentes ao adesivo Araldite 2047 foi observada uma perda de resistência de aproximadamente 27 % em comparação com os resultados obtidos à temperatura ambiente e de 13% relativamente aos resultados obtidos à temperatura de 40°C. Não ocorreu deformação plástica antes da rotura, assemelhando-se a uma rotura frágil.

Tabela 4: Resultados numéricos dos ensaios de tipo de *pull-out* realizados a 70°C

AR-2047	$F_{\text{máx}}$	F_u	$d(F_{\text{máx}})$	$d(F_u)$	Modos de Rotura
	(kN)	(kN)	(mm)	(mm)	
Provete 1	14.93	12.70	0.4	0.41	Rotura na interface vidro-adesivo
Provete 2	14.72	12.21	0.37	0.47	Rotura na interface vidro-adesivo
Provete 3	15.16	14.58	0.55	0.58	Rotura na interface vidro-adesivo
Média	14.94	13.16	0.44	0.49	
3M-DP490					
Provete 1	32.64	32.59	0.33	0.33	Rotura do vidro
Provete 2	20.05	19.43	0.27	0.28	Rotura pelo adesivo
Provete 3	30.71	30.68	0.29	0.29	Rotura do vidro
Média	27.80	27.57	0.30	0.30	

Nos ensaios correspondentes ao adesivo 3M DP490 foi observado um aumento da capacidade resistente do adesivo na ordem dos 14% em comparação com os resultados obtidos à temperatura ambiente e uma diminuição de 31% relativamente aos resultados obtidos à temperatura de 40°C. Não foi observada nenhuma deformação plástica antes da rotura. O modo de rotura do provete 2 deu-se pelo adesivo, apresentando uma capacidade de carga inferior em comparação com os restantes provetes.

Não se verificou modos de rotura associados ao esmagamento do vidro por compressão, nem associados às chapas de aço inox. Os modos de roturas são descritos na Tabela 4 e representados na Fig. 10.



a) Rotura na interface vidro-adesivo – A2047

b) Rotura do vidro – 3M DP490

Fig. 10: Modos de rotura dos provetes à temperatura de 70°C

Na Fig. 11 e na Tabela 5 são apresentados os resultados comparativos da capacidade de carga para cada sistema adesivo nas gamas de temperatura: 23°C, 40°C e 70°C.

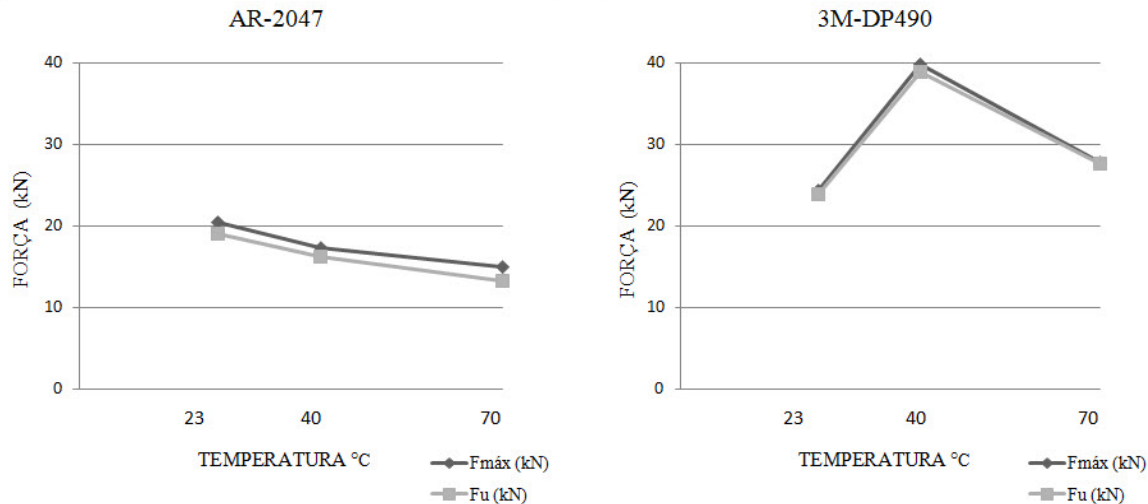


Fig. 11: Gráficos comparativos dos ensaios de tipo de *pull-out* realizados a diferentes temperaturas.

Tabela 5: Quadro resumo dos resultados numéricos dos ensaios de tipo de *pull-out* realizados a diferentes temperaturas

AR-2047	$F_{máx}$ \bar{x}	S	CV	F_u \bar{x}	S	CV	$d(F_{máx})$ \bar{x}	S	CV	$d(F_u)$ \bar{x}	S	CV
	(kN)	(kN)	(%)	(kN)	(kN)	(%)	(mm)	(mm)	(%)	(mm)	(mm)	(%)
23°C	20.39	2.47	12.10	19.01	3.35	17.63	0.69	0.20	29.09	0.81	0.23	28.48
40 °C	17.26	1.67	9.66	16.26	2.09	12.84	1.05	0.25	23.41	1.17	0.28	24.18
70 °C	14.94	0.22	1.47	13.16	1.25	9.51	0.44	0.10	21.92	0.49	0.09	17.60
3M-DP490												
23°C	24.37	0.96	3.95	23.89	1.17	4.92	0.21	0.09	41.60	0.21	0.10	49.56
40 °C	39.82	1.07	2.69	38.86	1.22	3.13	0.28	0.06	22.30	0.29	0.06	21.53
70 °C	27.80	6.78	24.93	27.57	7.11	25.79	0.30	0.03	10.18	0.30	0.03	8.82

Conclui-se, que o adesivo Araldite 2047 regista uma perda da capacidade de carga em função do aumento da temperatura. Apresenta uma significativa deformação plástica à temperatura ambiente e a 40°C, no entanto apresenta uma rotura frágil à temperatura de 70°C. Isto deve-se provavelmente ao facto da temperatura de transição vítrea do adesivo ser aproximadamente aos 80°C.

O adesivo 3M DP490 regista um aumento da capacidade de carga em comparação com os resultados obtidos em ensaios realizados à temperatura ambiente. Os valores mais altos de capacidade de carga foram medidos em ensaios realizados à temperatura de 40°C. A temperatura de transição vítrea do adesivo é aproximadamente 70°C. A partir desse valor de temperatura, verifica-se uma perda significativa de resistência do adesivo. Não ocorreu deformação plástica significativa, sendo o modo de rotura frágil.

6. Conclusão

O principal objetivo deste artigo foi identificar e comparar o comportamento da interface colada entre vidro e aço, através de dois sistemas adesivos à temperatura ambiente 23°C, 40°C e 70°C.

A partir dos resultados obtidos pelos testes *pull-out* a diferentes temperaturas, foi possível concluir-se:

– O adesivo Araldite 2047 teve um bom desempenho estrutural para o tipo de ligação estudada. Em todos os ensaios a rotura deu-se pelo adesivo ou na interface vidro-adesivo e apresentou boa resistência ao corte; a perda percentual máxima de capacidade de carga foi de apenas 27%; exhibe deformação plástica significativa; fácil manuseamento.

– O adesivo 3M DP490 exibiu em todos os ensaios um modo de rotura frágil; o aumento de temperatura beneficiou o adesivo em comparação com o seu desempenho à temperatura ambiente; à temperatura de 40°C e 70°C o modo de rotura deu-se pelo vidro; à temperatura ambiente, o adesivo exibiu valores de capacidade de carga inferiores, que poderá significar que o adesivo tenha sofrido uma pós-cura com a exposição a elevadas temperaturas. Não se verificou modos de rotura associados ao esmagamento do vidro por compressão, nem associados às chapas de aço inox.

Agradecimentos

Este trabalho é financiado por Fundos FEDER, através do Programa Operacional Factores de Competitividade – COMPETE, e por Fundos Nacionais, através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito do projeto PTDC/ECM/116609/2010 – S-GLASS: Desempenho Estrutural e Regras de Projeto de Vigas de Vidro Reforçadas Externamente.

Referências

- [1] Louter C. “Adhesively bonded reinforced glass beams”, *Heron*, 52 (1/2), 31-58, 2007.
- [2] Overend M, Jin Q, Watson J. “The selection and performance of adhesives for steel-glass connection”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, doi:10.1016/j.ijadhad.2011.06.001, 2011.
- [3] Nhamoinesu S, Overend M. “The mechanical performance of adhesives for steel-glass composite façade system”, *Proceedings of Challenging Glass 3*, Delft, Holanda, 2012.
- [4] Carvalho P, Cruz P, Veer F. “Perforated steel plate to laminated glass adhesive properties”, *Glass Performance days*, Tampere, Finlândia, 219-223, 2011.
- [5] Louter C, Fred Veer. “Redundancy of reinforced glass beams, temperature, moisture and time dependent behaviour of the adhesive bond”, *Proceedings of Challenging Glass 2*, Delft, Holanda, 2010.
- [6] Machalická K, Eliášová M, “Influence of various factors to mechanical properties of glued joint in glass”, *Proceedings of the second international conference on structures and architecture*, Guimarães, Portugal, 2013.